

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2019-85-12-58-64>

ВЛИЯНИЕ НАГРЕВА И ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КАНАТНОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ

© Вячеслав Михайлович Матюнин^{1*}, Артём Юрьевич Марченков¹, Павел Владимирович Волков¹, Василий Юрьевич Волоховский¹, Александр Николаевич Воронцов¹, Валентин Владимирович Гончаров²

¹ Национальный исследовательский университет «МЭИ», Россия, 111250, Москва, ул. Красноказарменная, д. 14; *e-mail: MatiuninVM@mpei.ru

² Центр «Промсервис», Россия, 162608, г. Череповец, ул. Мира, д. 30.

Статья поступила 28 января 2019 г. Поступила после доработки 15 апреля 2019 г. Принята к публикации 23 июля 2019 г.

Нагрев и термоциклирование канатной проволоки из углеродистой стали существенно влияют на ее механические свойства и долговечность работы всего каната в условиях эксплуатации. Однако несмотря на большой объем исследований по установлению причин разрушения канатов литейных кранов на металлургических заводах и выработке мероприятий по их устранению, аварии, связанные с их внезапным разрывом, происходят. Поэтому проблема остается сложной и требует дальнейших исследований. В настоящее время в конвертерных цехах металлургических предприятий внедрены новые системы отсоса выбросов горячих потоков воздуха, что позволило снизить опасно высокую температуру до $T = 240 - 300^\circ\text{C}$ и избежать перегрева канатов. Однако в этом температурном интервале металл проволок подвергается интенсивному влиянию синеломкости — явления, вызывающего снижение характеристик пластичности металла. В работе приведены результаты исследования влияния температуры нагрева и числа циклов при термоциклировании на изменения характеристик механических свойств проволок канатов из стали 70КК методом растяжения. Испытания проволоочных образцов проводили при комнатной температуре, а также после воздействия высокоинтенсивного нагрева и термоциклирования при различных температурах и числах циклов. Экспериментально подтверждено наличие зоны синеломкости для проволок каната диаметром 1,65 мм в интервале температур $T = 200 - 240^\circ\text{C}$. Установлено, что при температуре $T = 240^\circ\text{C}$ происходит наибольшее снижение относительного сужения (на 21 %) и повышение временного сопротивления на 4,8 %. Явление синеломкости следует учитывать при оценке конструкционной прочности стали. Показано, что существуют резервы по увеличению работоспособности канатов с учетом данных по диагностированию характеристик механических и магнитных свойств металла в производственных условиях.

Ключевые слова: канат; прочность; термоциклирование; растяжение; синеломкость.

THE EFFECT OF HEATING AND THERMOCYCLING ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON STEEL ROPE WIRE

© Vyacheslav M. Matyunin^{1*}, Artem Yu. Marchenkov¹, Pavel V. Volkov¹, Vasily Yu. Volokhovskiy¹, Alexander N. Vorontsov¹, Valentin V. Goncharov²

¹ National research university “Moscow Power Engineering Institute”, 14, Krasnokazarmennaya str., 111250, Moscow, Russia, *e-mail: MatiuninVM@mpei.ru

² “Promservice”, 30, Mira str., 162608, Cherepovets, Russia.

Received January 28, 2019. Revised April 15, 2019. Accepted July 23, 2019.

Heating and thermal cycling of carbon steel rope wire significantly affect the mechanical properties and durability of the entire rope under operating conditions. However, despite a large amount of studies aimed at determination of the reasons for destruction of the ropes of foundry cranes at metallurgical plants and development of measures for their elimination, accidents attributed to sudden rupture unfortunately occur. Therefore, the problem is still urgent and requires further research. Nowadays, new exhaust air suction systems for hot air streams mounted in converter shops of metallurgical enterprises reduce dangerously high temperatures to $T = 240 - 300^\circ\text{C}$ thus providing the possibility to avoid overheating of the ropes. However, the rope metal is exposed to a strong impact of blue brittleness – phenomenon, which causes reduction of the metal plasticity in this temperature range. We present the results of studying the

impact of the heating temperature and number of cycles in thermocycling on changes in the characteristics of the mechanical properties of steel 70KK wire ropes in tensile tests. Tests of the wire samples are carried out at room temperature and after their exposure to high-intensity heating and thermal cycling at different temperatures and number of cycles. confirmed Presence of zones of blue brittleness is proved experimentally for the wire rope with a diameter of 1.65 mm in a temperature range of 200 – 240°C. It is shown, that the largest reduction in the relative narrowing (21%) and increase in the ultimate tensile stress by 4.8% occurred at a temperature of 240°C. This phenomenon should be taken into account when assessing the structural strength of steel. It is shown that there are reserves to increase the life cycle of ropes, taking into account the data on diagnostics of the mechanical and magnetic characteristics in industrial conditions.

Keywords: rope; strength; thermal cycling; tension; blue brittleness.

Введение

Канаты литейных заливочных кранов в конвертерных цехах металлургических предприятий подвергаются воздействию высоких температур при многократной заливке жидкого чугуна из ковша в конвертер. Высокотемпературные циклические воздействия вызывают структурную деградацию металла, что приводит к ухудшению прочностных свойств стали. Структурная деградация обычно сопровождается абразивным износом проволок и уменьшением их несущего сечения. Подобные условия работы достаточно рискованны для каната как силовой механической конструкции. При нарушении технологии заливки, когда рабочие температуры канатов могут превышать $T = 450^\circ\text{C}$, возможны аварии механизма подъема с обрывом каната, падением траверсы с ковшом и разливом жидкого чугуна [1 – 3].

Канаты заливочных кранов проходят периодическое обследование методом магнитного неразрушающего контроля. Магнитный дефектоскоп регистрирует магнитный поток вдоль оси каната и определяет его отклонение, вызываемое двумя основными факторами — механическим износом и изменением магнитных свойств под влиянием высоких температур [4 – 6]. Главным диагностическим показателем износа каната является величина сигнала по каналу ПС (потеря сечения по металлу) магнитного дефектоскопа «ИНТРОС». На основании длительного опыта предложены практические критерии предельного состояния канатов литейных кранов. Канат подлежит замене, если наработка достигает 1200 плавок или относительная потеря сечения выходит за установленный предел 6 %. В качестве примера на рис. 1 показаны диагностические зависимости ПС шести канатов конструкции EN 12385-4-2000, полученные последовательно с октября 2017 г. по июль 2018 г. на одном из кранов металлургического завода. Средний ресурс данной выборки $N = 1147$ плавок, что близко к регламентируемому показателю $N^* = 1200$. Однако среднее значение ПС при отбраковке оказалось равным всего 3,2 %, максимальное — 3,6 %. Для

других канатов, работавших в сходных термомеханических условиях, среднее значение ПС — 3,4 %. Таким образом, замену канатов при средней наработке (ресурсе) $N = 1147$ плавок, проводили с диагностическим показателем ПС, почти в половину меньшим предельно допустимого значения 6 %. Очевидно, такое положение вещей экономически невыгодно, в связи с чем ставится задача продления ресурса канатов, включающая в том числе разработку и экспериментальное обоснование новых критериев предельного состояния металла.

Кроме того, в последние два-три года на предприятиях внедрены системы отсоса выбросов горячих потоков воздуха в конвертерах, что позволило ограничить вероятность нагрева канатов до опасно высокой температуры и снизить ее до $T = 240 - 300^\circ\text{C}$. В подобном температурном режиме магнитные свойства стали достаточно стабильны, что удобно с точки зрения магнитного контроля, однако в указанном интервале температур углеродистые стали подвержены влиянию синеломкости.

О явлении синеломкости углеродистых сталей известно давно [7, 8]. Синеломкость стали проявляется при нагреве до температуры, при которой на поверхности появляется окисная пленка синего цвета. При этом повышаются твердость и прочность стали, но снижаются пластичность и ударная вязкость. Если сталь на-

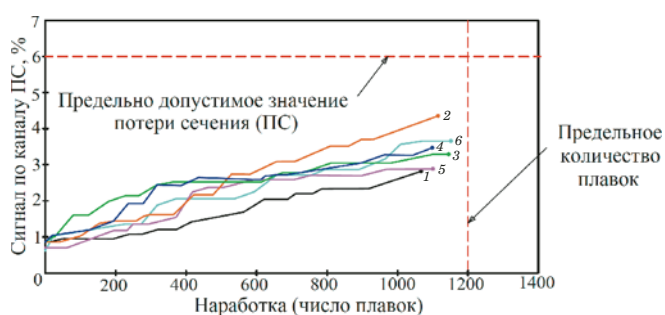


Рис. 1. Зависимость сигнала по каналу ПС дефектоскопа от наработки: 1 – 6 — номера канатов

Fig. 1. Dependence of the cross-section loss on the operating time: 1 – 6 — rope numbers

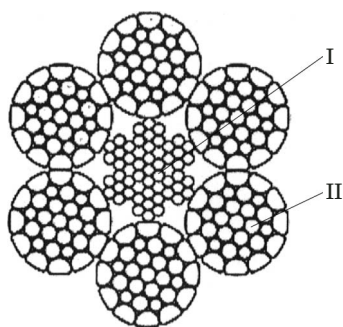


Рис. 2. Расположение прядей в канате и проволок в прядях: I — центральная прядь; II — внешние пряди

Fig. 2. Location of the strands in the rope and wires in the strands: I — the central strand; II — external strands

греть до температуры синеломкости, выдержать, а затем охладить до комнатной температуры, то изменения в значениях механических свойств не произойдут. Таким образом, синеломкость проявляется только при условиях механического нагружения и нагрева. Такие условия создаются при эксплуатации канатов. Установлено, что синеломкость возникает сильнее после предварительной пластической деформации стали. Наибольшие повышение временного сопротивления и снижение пластичности стали при синеломкости наблюдаются в интервале температур $T = 175 - 250^\circ\text{C}$. Однако этот температурный интервал может отличаться для различных углеродистых сталей в зависимости от их химсостава и предварительной обработки. Еще одна характерная особенность синеломкости состоит в том, что на диаграммах растяжения отмечается зубчатость — от предела текучести до (иногда) сопротивления разрушению, в зависимости от температуры испытания. Зубчатость диаграммы растяжения обусловлена скачкообразным движением полос скольжения в процессе пластической деформации металла. При максимальном проявлении зубчатости на диаграммах растяжения происходит наибольшее повышение прочности и снижение пластичности. Образование зубчатости на диаграммах растяжения объясняют быстрым закреплением подвижных дислокаций при деформации и увеличении плотности дислокаций. Однако при температуре более 250°C зубчатость исчезает вследствие того, что блокирование дис-

локаций атмосферами Коттрелла больше не влияет на пластическую деформацию и подвижность дислокаций возрастает. На развитие синеломкости влияют также и мелкодисперсные выделения на дислокациях, например Fe_{16}N , как это было установлено в работе [9]. Можно полагать, что синеломкость, как и динамическое деформационное старение, является частными случаями проявления эффекта Портевена – Ле Шателье в условиях воздействия различных температурно-деформационных и скоростных факторов. Известно также, что эффект Портевена – Ле Шателье проявляется, например, при образовании деформационных полос Людерса – Чернова на поверхности образца при его растяжении или при индентировании алюминиевого сплава [10], что отражается на диаграммах деформирования в виде зубчатости (микроскачков деформации).

Для обеспечения нормальной работоспособности канатов литейных кранов и установления критериев их безаварийной работы необходимо провести исследование влияния эксплуатационных факторов на структурно-механическое состояние металла проволок канатов, включающее материаловедческий анализ и исследование его прочностных характеристик.

Цель работы — исследование влияния высокоинтенсивного нагрева и термоциклирования при различных температурах и числах циклов на микроструктуру и механические свойства металла проволок канатов. Особое внимание уделено исследованию влияния синеломкости на характеристики механических свойств металла проволок каната.

Материалы и методы исследования

Исследовали отрезки каната конструкции $6 \times \text{K}31(1+6+6/6+12)+7 \times 7(1+6)$ стандарта EN 12385-4-2000 (диаметр каната $D = 42,0$ мм, проволока без покрытия маркировочной группы 1770 Н/мм² по DIN 2078, материал — сталь 70КК). Значения диаметров проволок каната приведены в табл. 1. Эксперименты проводили на двух образцах — отрезках каната в состоянии поставки (первый) и после эксплуатации на заливочном кране (второй).

Таблица 1. Диаметры проволок (мм) каната $D = 42,0$ мм стандарта EN 12385-4-2000

Table 1. Wire diameters (mm) of the rope $D = 42.0$ mm manufactured in accordance with EN 12385-4-2000 standard

Проволоки сердечника				Проволоки прядей каната					Расчетная площадь сечения каната, мм ²
Центральная прядь		Прядь в повиве		Централь- ная, 6 шт.	1-го слоя, 36 шт.	2-го слоя		3-го слоя, 72 шт.	
Централь- ная, 6 шт.	В слое, 6 шт.	Централь- ная, 6 шт.	В слое, 36 шт.			36 шт.	36 шт.		
2,00	1,80	1,80	1,65			2,10	2,00		

Канат состоит из центральной пряди I (сердечника) и шести внешних прядей II (рис. 2). Пряди проволоки расположены в виде слоев, каждый из которых состоит из нескольких проволок одинакового диаметра, находящихся на равном удалении от центра пряди. Слои отличаются только диаметрами проволок.

Для испытаний на растяжение при комнатной температуре из отрезков каната в состоянии поставки и после эксплуатации из каждого слоя прядей было изготовлено 72 образца длиной $l = 200$ мм.

При подготовке проволок к термоциклированию и последующим испытаниям на растяжение из разных слоев прядей каната в состоянии поставки изготавливали 180 образцов длиной $l = 200$ мм. Термоциклирование образцов проводили при температурах T , равных 100, 200, 350 °C и N , равных 400, 800, 1200 циклов. Далее эти образцы испытывали на растяжение при комнатной температуре.

Для термоциклирования использовали электропечи Nabertherm, а температуру образцов измеряли дистанционно — инфракрасным пирометром TemPro-2200 (температурный диапазон измерений — от -50 до 2200 °C, точность ± 1 %). Термоциклирование образцов проводили одновременно в трех печах: в первой — при $T = 100$ °C, во второй — при $T = 200$ °C, в третьей при $T = 350$ °C. Образцы помещали в печь, нагретую до заданной температуры, и выдерживали в ней одно и то же время (семь минут). Образцы охлаждали на открытом воздухе в течение пяти минут. При загрузке в печь охлажденных на открытом воздухе проволоочных образцов температура в печах падала не более чем на 5 °C относительно заданного значения.

Испытания на растяжение проволок при комнатной и повышенной температурах проводили на универсальной испытательной машине Instron 5982 со скоростью деформирования 5 мм/мин. В процессе испытаний определяли временное сопротивление σ_b и относительное конечное сужение ψ проволок после разрыва. (Выбор относительного сужения обусловлен тем, что оно не зависит от кратности разрывного образца, в отличие от относительного удлинения.) Для проведения температурных испытаний на растяжение проволок из отрезков каната в состоянии поставки было подготовлено из разных слоев прядей 45 образцов длиной $l = 200$ мм. Испытания проводили при комнатной температуре, а также при температурах T , равных 100, 200, 350, 380 °C. Для более детального исследования температурной зоны синеломкости были также испытаны проволоки диаметром $d = 1,65$ мм из внешней пряди каната при температурах T , равных 220, 240, 380 °C. Испытания при $T = 380$ °C

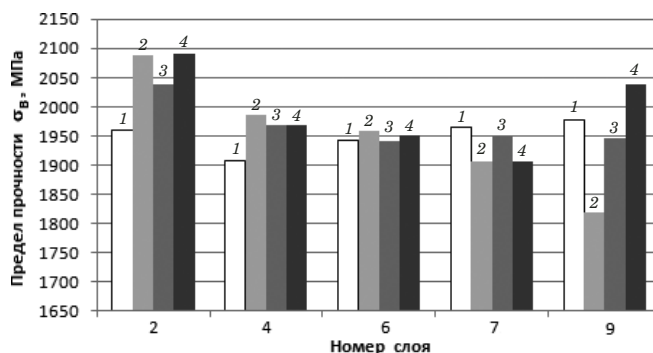


Рис. 3. Распределение временного сопротивления σ_b в проволоках прядей каната, прошедших термоциклирование при $T = 100$ °C при количестве термоциклов N , равных 0 (1), 400 (2), 800 (3), 1200 (4)

Fig. 3. Distribution of the ultimate tensile stress σ_b of the rope wires after thermal cycling at $T = 100$ °C at different number of thermal cycles N : $N = 0$ cycles (1), $N = 400$ cycles (2), $N = 800$ cycles (3), $N = 1200$ (4)

дополнительно убедили в тенденции к уменьшению прочности и увеличению пластичности проволок при повышении температуры нагрева выше температурного интервала синеломкости.

Микроструктуру металла канатов исследовали на поперечных микрошлифах с использованием микроскопа Zeiss Observer Z1m при увеличениях 50 – 500.

Результаты и их обсуждение

Анализ результатов испытаний растяжением выявил неравномерный характер распределения временного сопротивления σ_b в проволоках разных слоев. На рис. 3 представлено распределение временного сопротивления σ_b в проволоках прядей каната, прошедших термоциклирование при $T = 100$ °C и N , равных 400, 800, 1200 циклов, а также в проволоках, испытанных на растяжение при комнатной температуре ($T = 20$ °C) без термоциклирования. Видно, что значения временного сопротивления материала проволок разных слоев каната распределены неравномерно. Без термоциклирования проволок относительная разница между минимальным и максимальным значениями σ_b составила 3,7 %. После $N = 400$ циклов σ_b монотонно уменьшается — от проволок слоя 2 до проволок слоя 9, достигая в последних минимального значения. В этом случае отклонение σ_b достигло наибольшего значения, равного 13,0 %. Анализ результатов всех испытаний на растяжение, в том числе температурных, а также проведенных с термоциклированием и без него показал, что отклонение 13 % — самое значительное. После $N = 800$ циклов σ_b материала проволок снижается — от слоя 2 к слою 6. Различие между минимальным (в

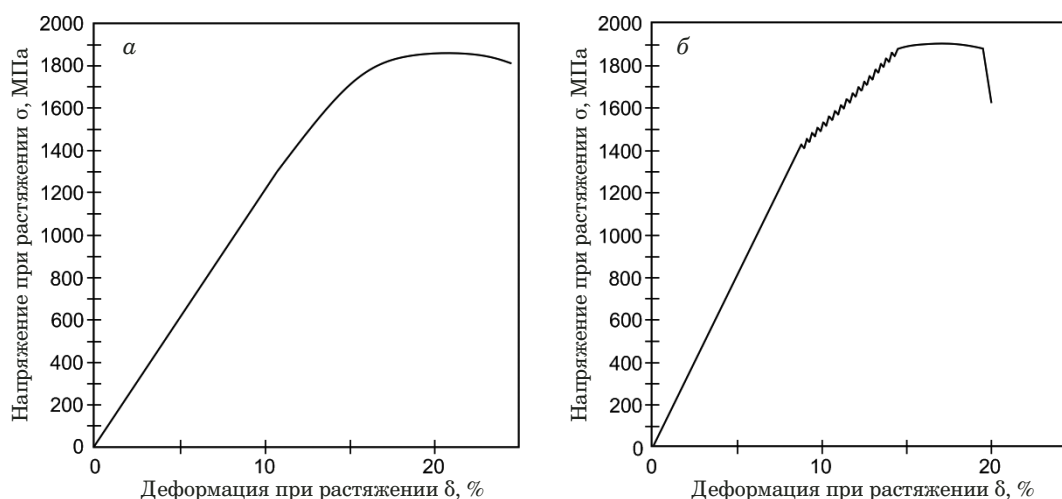


Рис. 4. Диаграммы растяжения проволоки диаметром $d = 1,65$ мм: a и b — T равна 20 и 220 °C

Fig. 4. Tension diagrams of the wire $d = 1.65$ mm: a — $T = 20$ °C; b — $T = 220$ °C

слое № 6) и максимальным (в слое № 2) значениями σ_b — 4,8 %.

После $N = 1200$ циклов наблюдается почти такая же картина, как и у проволок, прошедших $N = 400$ циклов. Различие между минимальным и максимальным значениями σ_b — 8,8 %. У образцов проволок после термоциклирования при $T = 200$ °C относительное отклонение σ_b составило не более 8,1 %. Однако для образцов, прошедших термоциклирование при $T = 350$ °C после N , равного 400 и 800 циклов, величина отклонения σ_b составила 10,7 %, а после $N = 1200$ циклов — 7,5 %. У проволок прядей в состоянии поставки, испытанных на растяжение при комнатной температуре, величина относительного отклонения временного сопротивления оказалась равной 8,3 %, а после эксплуатации — 9,7 %; после температурных испытаний на растяжение значение этого отклонения не превысило 5,4 %.

Таблица 2. Изменение временного сопротивления σ_b и относительного сужения ψ при нагреве проволок диаметром $d = 1,65$ мм

Table 2. The values of ultimate tensile stress σ_b and relative narrowing ψ for the wires ($d = 1.65$ mm) at different temperatures

Температура T , °C	Временное сопротивление σ_b , МПа	Относительное сужение ψ , %
20	1904	52
100	1825	48
200	1902	46
220	1920	42
240	1995	41
350	1291	44
380	1260	50

Следует отметить, что предварительные испытания на растяжение проволок каната при разных температурах нагрева показали, что действительная температурная зона синеломкости находится вблизи 200 °C. На рис. 4, a представлена диаграмма растяжения проволоки диаметром $d = 1,65$ мм, полученная при температуре $T = 20$ °C, а на рис. 4, b — диаграмма растяжения той же проволоки, полученная при $T = 220$ °C. Видно, что на второй диаграмме отчетливо проявляется зубчатость.

Дополнительные испытания на растяжение показали, что максимальное значение $\sigma_b = 1995$ МПа достигнуто при $T = 240$ °C. При указанной температуре относительное сужение $\psi = 41$ % этой же проволоки оказалось самым меньшим из полученных в проведенных испытаниях (табл. 2).

Таким образом, при температуре нагрева $T = 240$ °C в наибольшей мере проявляется эффект синеломкости: повышение прочности (временного сопротивления σ_b) и снижение пластичности (относительного сужения ψ). Причем 240 °C — типичная рабочая температура проволок исследованного каната. Относительное изменение механических характеристик при повышении температуры от 20 до 240 °C: σ_b увеличивается на 4,8 %, ψ уменьшается на 21 % (рис. 5).

Металлографические исследования показали, что структура металла проволок в состоянии поставки независимо от температуры нагрева и количества циклов термоциклирования практически не изменялась и представляла собой квази-эвтектоидную механическую смесь феррита и цементита. Структура металла однородная, дефектов типа трещин, пор, расслоений, флокенов и крупных неметаллических включений обнаружено не было. По всему объему наблюдались еди-

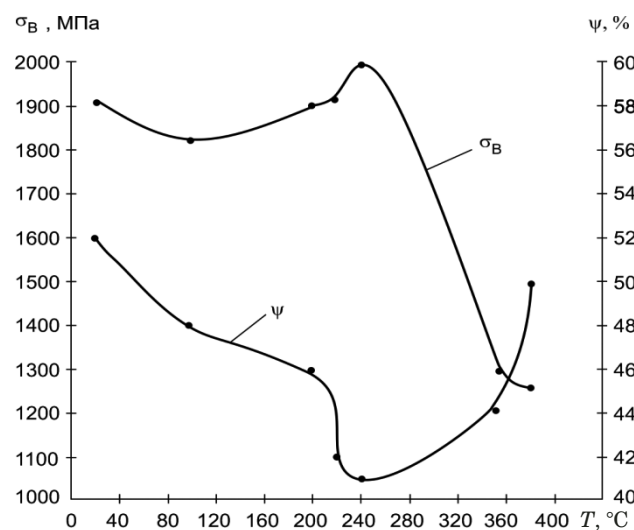


Рис. 5. Изменение прочности (σ_b) и пластичности (ψ) проволоки каната $d = 1,65$ мм при нагреве

Fig. 5. Change in the strength (σ_b) and plasticity (ψ) of $d = 1.65$ mm rope wire upon heating

нические неметаллические включения размером не более 2 мкм.

Данные механических испытаний проволок на разрыв позволяют ввести коэффициенты, характеризующие влияние температуры и количества термоциклов (заливок чугуна) на изменение прочности каната.

Температурный коэффициент изменения прочности $k_T = \sigma_{b,T}/\sigma_b$ представляет собой отношение структурно осредненных значений временного сопротивления горячего ($\sigma_{b,T}$) и холодного (σ_b) канатов в состоянии поставки, т.е. при нулевой наработке (рис. 6).

При температуре испытаний $T = 350$ °C прочность «горячего» каната снижается примерно на 34 % по сравнению с прочностью «холодного» (остывшего). Данный результат согласуется с рекомендациями [11], согласно которым в диапазоне рабочих температур $T = 350 - 400$ °C минимальная проектная разрушающая осевая нагрузка на канат должна быть уменьшена на 35 %. Некоторое увеличение коэффициента k_T при температуре $T = 200$ °C обусловлено повышением прочности вследствие эффекта синеломкости.

Результаты термических испытаний, моделирующих наработку каната, позволяют получить расчетные оценки двухпараметрического коэффициента изменения прочности $k_{T,N} = \sigma_{b,T,N}/\sigma_b$. Временное сопротивление $\sigma_{b,T,N}$ относится к холодному (остывшему) канату, который отработал N термоциклов при температуре T , а σ_b — к состоянию поставки при $T = 20$ °C и $N = 0$. Столбчатая диаграмма эмпирических значений $k_{T,N}$ приведена на рис. 7.

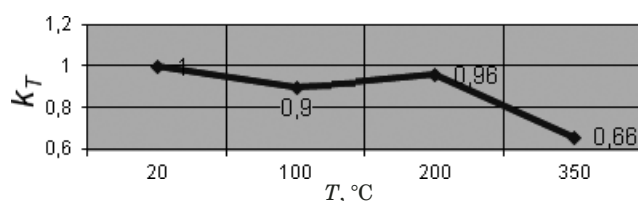


Рис. 6. Изменение коэффициента k_T в зависимости от температуры

Fig. 6. Temperature dependence of the k_T coefficient

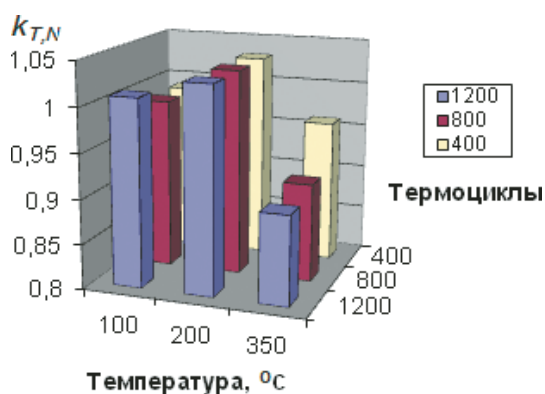


Рис. 7. Относительное изменение временного сопротивления каната при различных режимах термоциклирования

Fig. 7. Relative change in the ultimate tensile stress σ_b of the rope under different modes of thermal cycling

Из диаграммы видно, что после термоциклирования каната при температуре $T = 350$ °C наблюдается постепенное снижение прочности металла с ростом количества термоциклов и при достижении 1200 циклов канат теряет примерно 10 % исходной несущей способности. После термоциклирования каната при температуре $T = 200$ °C наблюдается упрочнение металла каната на 2 – 3 % при всех исследованных количествах термоциклов (400, 800 и 1200 циклов), что обусловлено влиянием синеломкости.

Линейная экстраполяция семейства диагностических зависимостей (см. рис. 1) канатов нескольких литейных кранов на предельное значение ПС, равное 6 %, показывает, что среднее продление ресурса ΔR по отношению к регламентируемому показателю $R = 1200$ циклов лежит в диапазоне $\Delta R = 400 - 500$ циклов (плавков). Консервативная оценка продления ресурса с учетом реальных условий работы канатов в горячем состоянии и переменных температурных воздействий получается умножением расчетного значения ΔR на поправочный коэффициент $k_T k_{T,N} \leq 1$. Таким образом, проведенные исследования в совокупности с данными диагностирования позволяют дать рекомендации по увеличению работоспособности канатов в существующих производственных условиях.

Заключение

Анализ данных, полученных при испытаниях проволоочных образцов на растяжение при разных температурах, включая комнатную, а также образцов, прошедших термоциклирование с различным числом циклов, выявил неравномерный характер изменения временного сопротивления металла проволок разных диаметров. Для всех испытанных проволок различие между максимальными и минимальными значениями временного сопротивления находилось в диапазоне от 3,7 до 10,7 % в зависимости от месторасположения в разных слоях каната. При этом микроструктура металла проволок каната практически не изменялась и представляла собой квази-эвтектоидную механическую смесь феррита и цемента.

Испытания на растяжение проволок при разных температурах нагрева подтвердили, что синеломкость проявляется достаточно четко и сопровождается повышением прочности и снижением пластичности. Установлено, что при температуре $T = 240^\circ\text{C}$ происходит наибольшее снижение относительного сужения (на 21 %) при увеличении временного сопротивления на 4,8 % по сравнению с данными механическими характеристиками при комнатной температуре. Такое снижение характеристики пластичности ψ повышает вероятность образования трещин и способствует большей склонности металла к хрупкому разрушению под воздействием рабочих нагрузок. Поэтому можно считать, что температура $T = 240^\circ\text{C}$ для данного типа проволок каната является наиболее опасной с точки зрения конструкционной прочности и долговечности каната, тем более что эта температура является наиболее типичной для условий эксплуатации канатов.

Показано, что существуют резервы по увеличению работоспособности и долговечности канатов с учетом диагностического параметра ПС в соответствующих производственных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Промышленная безопасность при эксплуатации грузоподъемных кранов: сб. документов. Сер. 10. Вып. 7. — М.: ГУП «НТЦ Промышленная безопасность» Госгортехнадзора России, 2002. — 304 с.
2. Малов В. П., Попов В. Г. Проблемы промышленной безопасности конвертерного производства и пути их преодоления / Безопасность труда в промышленности. 2004. № 10. С. 23 – 26.

3. ISO 4309:2017. “Cranes – Wire Ropes – Care, Maintenance, Installation, Examination and Discard”. — Switzerland, Geneva: ISO Copyright Office, 2017.
4. Сухоруков В. В., Воронцов А. Н., Волоховский В. Ю. Контроль износа канатов заливочных кранов металлургических предприятий / Черные металлы. 2013. № 10. С. 56 – 60.
5. Воронцов А. Н., Слесарев Д. А., Волоховский В. Ю. Прогнозирование индивидуального ресурса стальных канатов / Безопасность труда в промышленности. 2003. № 8. С. 19 – 21.
6. Siviryuk V. L., Gramotnik V. K., Bezrukov A. N., Shtai-ger A. G. Magnetic-field testing of steel ropes via a KPM-TsK-2M instrument / Russian Journal of Nondestructive Testing. 2006. Vol. 42. N 6. P. 363 – 368.
7. Долженков И. Е. О природе синеломкости стали / Митом. 1971. № 3. С. 42 – 47.
8. Горицкий В. М. Тепловая хрупкость стали. — М.: Металлургиздат, 2007. — 384 с.
9. Brindley B., Barnby J. Dynamic strain ageing in mild steel / Acta Metallurgica. 1966. Vol. 14. N 12. P. 1765 – 1780.
10. Головин Ю. И., Иволгин В. И., Лебедин М. А., Сергунин Д. А. Область существования эффекта Портевина – Ле-Шателье в условиях непрерывного индентирования сплава Al-2,7 % Mg при комнатной температуре / Физика твердого тела. 2004. Том 46. № 9. С. 1618 – 1620.
11. Bridon Crane Rope Catalogue. Edition 7. — UK, Doncaster, South Yorkshire. 2011.

REFERENCES

1. Industrial safety in the operation of cranes. Collection of documents. Episode 10. Issue 7. — Moscow: GUP “STC Industrial safety” of Gosgortekhnadzor of Russia, 2002. — 304 p. [in Russian].
2. Malov V. P., Popov V. G. Problems of industrial safety of converter production and ways to overcome them / Bezopasn. Truda Promyshl. 2004. N 10. P. 23 – 26 [in Russian].
3. ISO 4309:2017. “Cranes – Wire Ropes – Care, Maintenance, Installation, Examination and Discard”. — Switzerland, Geneva: ISO Copyright Office, 2017.
4. Sukhorukov V. V., Vorontsov A. N., Volokhovskiy V. Yu. Control of wear of the ropes of hot metal cranes of metallurgical enterprises / Chern. Met. 2013. N 10. P. 56 – 60 [in Russian].
5. Vorontsov A. N., Slesarev D. A., Volokhovskiy V. Yu. Prediction of the individual resource of steel cables / Bezopasn. Truda Promyshl. 2003. N 8. P. 19 – 21 [in Russian].
6. Siviryuk V. L., Gramotnik V. K., Bezrukov A. N., Shtai-ger A. G. Magnetic-field testing of steel ropes via a KPM-TsK-2M instrument / Russian Journal of Nondestructive Testing. 2006. Vol. 42. N 6. P. 363 – 368.
7. Dolzhenkov I. E. The nature of blue brittleness of steel / Metalloved. Term. Obrab. Met. 1971. N 3. P. 42 – 47 [in Russian].
8. Goritskiy V. M. Thermal brittleness of steels. — Moscow: Metallurgizdat, 2007. — 384 p. [in Russian].
9. Brindley B., Barnby J. Dynamic strain ageing in mild steel / Acta Metallurgica. 1966. Vol. 14. N 12. P. 1765 – 1780.
10. Golovin Yu. I., Ivolgin V. I., Lebedkin M. A., Sergunin D. A. Portevin – Le Chatelier effect for Al-2.7% Mg aluminum alloy instrumented indentation at ambient temperature / Fiz. Tv. Tela. 2004. Vol. 46. N 9. P. 1618 – 1620 [in Russian].
11. Bridon Crane Rope Catalogue. Edition 7. — UK, Doncaster, South Yorkshire. 2011.